

10;12

Генератор хаотических колебаний с электронной обратной связью и магнитным полем на катоде

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Л.Н. Волкова

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: noios@sgu.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2009 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования низковольтного виркатора с электронной обратной связью при наличии магнитного поля на катоде. Показано, что ведение магнитного поля на катоде в случае, когда его силовые линии не совпадают с траекториями электронов, приводит к существенному улучшению характеристик и параметров низковольтного виркатора.

СВЧ-генераторы с электронной обратной связью (низковольтные виркаторы) находят все большее применение в различных радиотехнических системах и технологических процессах [1]. Представляется интересным экспериментально исследовать влияние магнитного поля на катоде на характеристики таких генераторов.

Электроны в неоднородном магнитном поле приобретают существенное поперечное вращательное движение, что способствует развитию TE -моды на гиротронном эффекте. Наличие магнитного поля вблизи катода при $\alpha \neq 0$ приводит к появлению вращательного движения (появлению азимутальной скорости), что приводит как к уменьшению продольной скорости, так и к дополнительному сжатию пучка (т.е. к появлению сгустков пространственного заряда). Эти причины приводят к турбулизации пучка, что способствует образованию распределенного виртуального катода (сгустков пространственного заряда). Заметим,

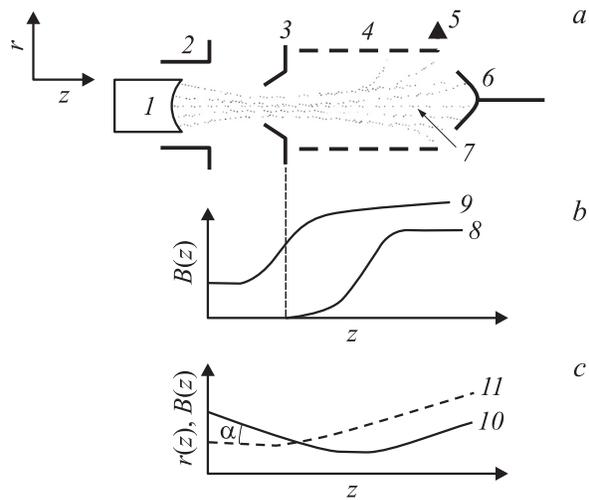


Рис. 1. Эскиз исследуемого макета (а), распределение индукции магнитного поля (b) и силовая линия магнитного поля и траектория электрона (c). 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4 — съемник СВЧ-энергии, 5 — вывод энергии, 6 — коллектор, 7 — электронный пучок, 8 — распределение $B(z)$ при полной экранировке катода от магнитного поля, 9 — распределение $B(z)$ при частичной экранировке катода от магнитного поля, 10 — траектория электрона, 11 — силовая линия магнитного поля, α — угол между $r(z)$ и $B(z)$.

что переход электронов в такое состояние характеризуется малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков электронов.

Экспериментальные исследования проводились на макете генератора (рис. 1) на разборной вакуумной установке [2] при непрерывной откачке в импульсном режиме. Длительность импульса $5\text{--}50\ \mu\text{s}$, ускоряющее напряжение $1500\text{--}2000\ \text{V}$ при токе пучка $150\text{--}200\ \text{mA}$. Потенциал коллектора изменялся от $K = U_m/U_0 = 0 \div 1$ (U_0 — ускоряющее, U_m — тормозящее напряжение), СВЧ-сигнал снимался с вывода энергии отрезка спирали. Величина и распределение магнитного поля могли изменяться от $B_c/B_i = 0$ (B_c — магнитное поле на катоде, B_i — магнитное поле в области взаимодействия) до $B_c/B_i = 1$ (рис. 1, b). При этом была возможность подбирать распределение

магнитного поля таким образом, чтобы его силовые линии совпадали с траекториями электронов ($\alpha = 0$), а также анализировать случаи, когда $\alpha \neq 0$ (рис. 1, *c*). Индукция магнитного поля B_i изменялась в пределах $0.05 \div 0.07$ Т.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований. Зависимость относительной мощности генерации от величины торможения K (рис. 2, *a*) показывает, что введение магнитного поля на катод по-разному влияет на величину максимума мощности. Для описания различных состояний системы введено обозначение S , которое в случае полной экранировки катода от магнитного поля приравнивается к 1, в случае отсутствия экранировки и $\alpha = 0$ приравнивается к 2 и $\alpha \neq 0$ — к 3. При $S = 2$ генерация начинается при больших K ($K = 0.4$), чем в случае экранировки ($S = 1$), но и максимум достигается при больших K ($K = 0.8$). Если же $\alpha \neq 0$, то генерация начинается практически при $K = 0$ и достигает максимума при $K = 0.35$. При этом резко возрастает максимальная интегральная мощность и увеличивается полоса генерации (рис. 2, *b*).

Для случая $S = 2$ ($B_c/B_i \neq 0$, $\alpha = 0$) наблюдается незначительное увеличение максимальной мощности и небольшое уменьшение полосы генерации. Оптимальная величина B_c/B_i составляет для случая $S = 3$ ($K = 0.35$) 0.5–0.6 (рис. 2, *c*).

Полученным результатам можно дать следующее объяснение. Введение магнитного поля на катод при $\alpha = 0$ (пушка с магнитным сопровождением) [3] приводит к тому, что электроны не пересекают силовые линии магнитного поля и, следовательно, магнитное поле оказывает слабое влияние на движение электронов. Магнитное поле сильно влияет на „возмущенные“ электроны, эмитированные под углом к нормали, и „парализует“ действие их поперечных скоростей. При этом увеличивается стабильность электронного пучка.

При введении магнитного поля на катод при $\alpha \neq 0$ электроны приобретают азимутальную составляющую скорости v_ϕ . И как следует из закона сохранения энергии:

$$v_z^2 + v_r^2 + v_\phi^2 = -2\eta U_0,$$

где v_z , v_r — продольная и поперечная составляющие скорости электронов, $v_\phi = r(d\theta/dt)$ — азимутальная скорость, $d\theta/dt$ — угловая скорость, r — радиальная координата электрона. Расчеты показывают, что в этом случае резко уменьшается продольная скорость,

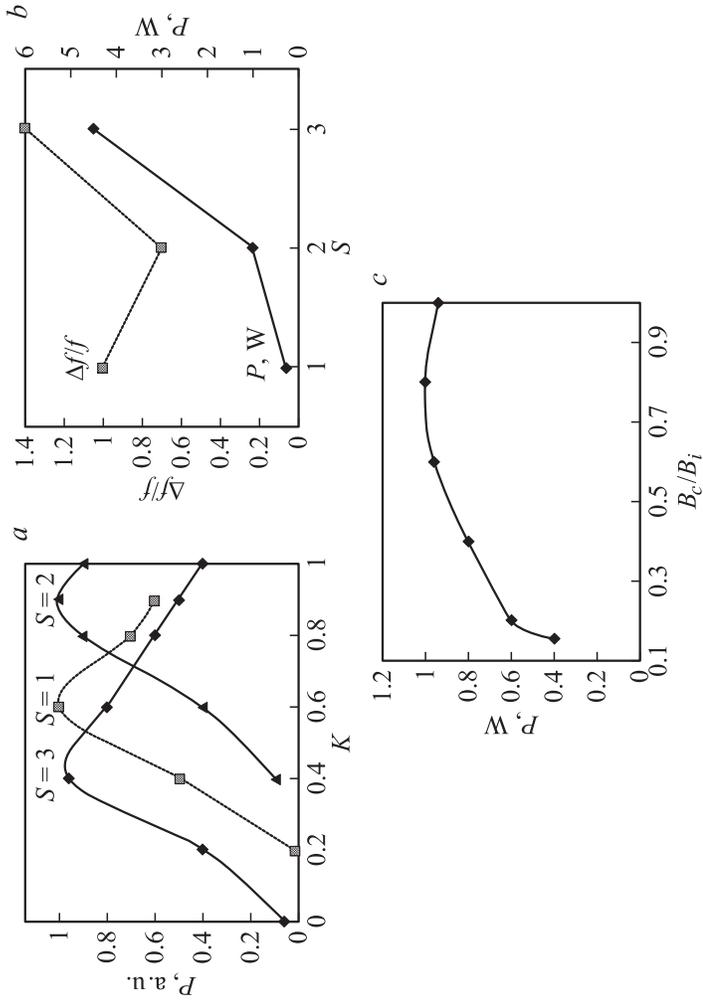


Рис. 2. Зависимость выходной мощности P , полосы частот генерации $\Delta f/f$ от тормозящего потенциала K (a), параметра экранировки (b) и относительной величины магнитного поля на катоде B_c/B_i (c). $S = 1$ соответствует $B_c/B_i = 0$; $S = 2, 3$ — $B_c/B_i \neq 0$. $S = 2$ соответствует $\alpha = 0$; $S = 3$ — $\alpha \neq 0$.

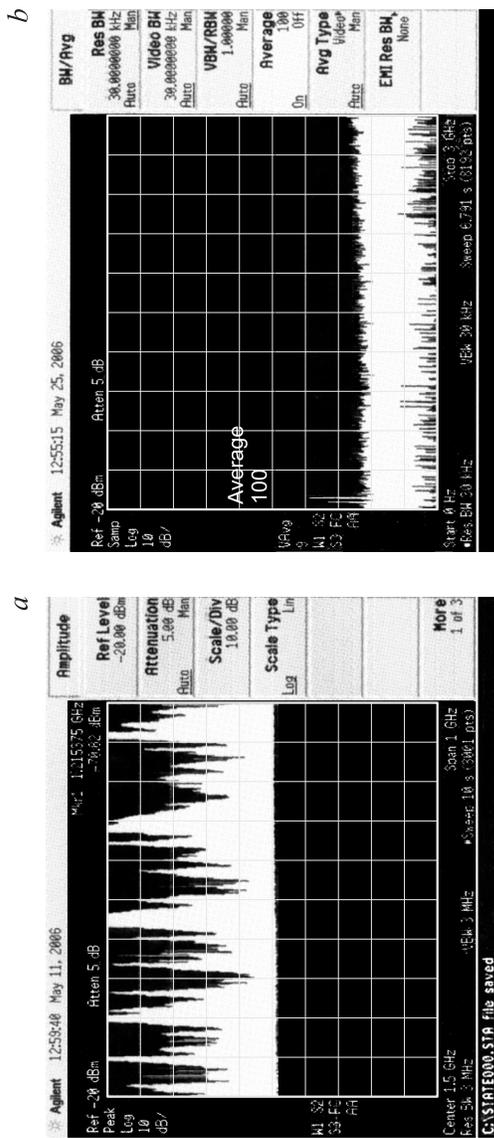


Рис. 3. Спектры шумоподобных колебаний: *a* — $S = 1$, $K = 0.6$; *b* — $S = 3$, $K = 0.4$, $\alpha \neq 0$.

а возрастают поперечные и азимутальные составляющие. При этом увеличивается длина пути электронов. Отметим, что магнитное поле на катоде действует на электроны с малыми скоростями, эмитированными с катода, что является также причиной более медленного движения электронов к аноду. Электронный пучок в этом случае становится неламинарным (турбулентным).

Как показали расчеты, в турбулентном пучке образуются сгустки (пакеты) электронов, плотность пространственного заряда в которых в несколько раз больше среднего значения. Такие образования (сгустки) неустойчивы, они колеблются во времени и пространстве и являются дополнительными источниками шумоподобных СВЧ-колебаний.

На рис. 3 приведены спектры шумоподобных СВЧ-колебаний для случая полной экранировки катода от магнитного поля $V_c/V_i = 0$ (рис. 3, *a*), для $V_c/V_i \neq 0$ и $\alpha \neq 0$ (рис. 3, *b*).

Видно, что наличие магнитного поля на катоде при несовпадении его силовых линий с траекториями электронов ($\alpha \neq 0$) позволяет получить более равномерный спектр с малой изрезанностью по амплитуде.

Таким образом, введение магнитного поля в область катода низковольтного виркатера при $\alpha \neq 0$ позволяет увеличить интегральную мощность с 200 мВт до 4.5 Вт и расширить полосу частот в 1.4 раза.

Работа была выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (РНП 2.1.1/235).

Список литературы

- [1] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 71–77.
- [2] Калинин Ю.А., Ессин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ электронике. Ч. 1. Саратов: Изд-во СГУ, 1991. 212 с.
- [3] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. С. 453.